

УДК 621.1.018

А.П. ПОЛИВЯНЧУК

Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, Украина

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ НОРМИРУЕМЫХ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ С ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ ДИЗЕЛЕЙ

Исследована возможность повышения точности измерений массовых выбросов монооксида углерода, углеводородов, оксидов азота и твердых частиц с отработавшими газами дизельных двигателей. Предложена методика оценки значимости отдельных составляющих результирующих погрешностей измерений данных показателей. Даны рекомендации по избирательному повышению точности измерений параметров испытываемого дизеля и газоаналитического оборудования.

нормы EURO, дизель, отработавшие газы, загрязняющие вещества, массовый выброс, испытательный цикл, точность, результирующая погрешность

Введение

Важную роль в обеспечении экологической безопасности дизельных двигателей играет контроль нормируемых показателей токсичности отработавших газов (ОГ) дизелей. Такими показателями являются среднеексплуатационные массовые выбросы с ОГ газообразных загрязняющих веществ (монооксида углерода – CO , углеводородов – CH , оксидов азота – NO_x) и твердых частиц ($ТЧ$). В нормативных документах они обозначаются, как показатели GAS_x и PT (от англ. «particles» – частицы) [1].

В последнее время все более актуальной становится задача обеспечения требуемой точности измерений названных показателей. Это обусловлено существенным уменьшением их значений в виду поэтапного ужесточения требований экологических стандартов. Так, за 14 лет после введения в автомобильном транспорте стран ЕС норм EURO измеряемые выбросы CO , CH , NO_x и $ТЧ$ с ОГ дизелей грузовых автомобилей уменьшились в 3, в 2,4, в 2,3 и в 18 раз, соответственно (рис. 1).

Для решения данной задачи необходимо определять способы повышения точности измерений показателей GAS_x и PT .

Целью исследований являлось снижение результирующих погрешностей измерений среднеексплуатационных массовых выбросов загрязняющих веществ с ОГ дизелей, испытываемых на стационарных циклах, путем избирательного повышения точности измерений отдельных параметров двигателя и газоаналитического оборудования (ГАО).

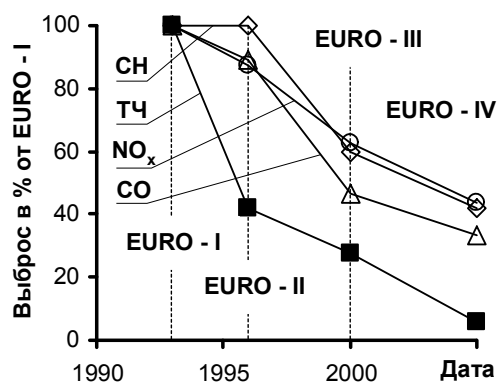


Рис. 1. Динамика изменения норм EURO, установленных для дизелей грузовых автомобилей

Для достижения данной цели **решены следующие задачи:**

– изучение процедур определения показателей GAS_x и PT и установление составляющих результирующих погрешностей измерений данных величин δGAS_x и δPT ;

- разработка методики оценки значимости отдельных составляющих результирующих погрешностей измерений величин GAS_x и PT ;
- исследование влияния погрешностей измерений параметров двигателя и ГАО на погрешности δGAS_x и δPT ;
- разработка рекомендаций по повышению точности измерений нормируемых выбросов загрязняющих веществ с $ОГ$ дизелей.

1. Анализ возможности повышения точности измерений величин GAS_x и PT

Измерение нормируемых выбросов загрязняющих веществ с $ОГ$ дизелей в ходе выполнения стационарных циклов осуществляется следующим образом. Испытываемый двигатель последовательно работает на всех режимах испытательного цикла с заданными значениями числа оборотов вала двигателя – n и крутящего момента – M_k . Количество режимов цикла и значения n и M_k зависят от типа двигателя: для автомобильных дизелей установлен 13-ступенчатый цикл [2], для тракторных и комбайновых – 8-ступенчатый [3], для тепловозных – 3-ступенчатый [4] (отечественный аналог – 5-ступенчатый цикл ГСТУ 32.001-94 [5]) и т.д.

Доля каждого режима в процессе эксплуатации дизеля учитывается с помощью соответствующего весового коэффициента WF .

Для измерения среднеэксплуатационных выбросов газообразных загрязняющих веществ с $ОГ$ дизеля – GAS_x могут использоваться два способа: анализ «сырых» (не разбавленных) $ОГ$ и анализ $ОГ$, разбавленных чистым воздухом. Первый способ предусматривает измерение на каждом режиме испытаний концентраций загрязняющих веществ в $ОГ$ – $conc_i$ (ppm) и вычисление массовых выбросов данных веществ – $M_{GAS_{xi}}$:

$$M_{GAS_{xi}} = u \cdot conc_i \cdot G_{eh_i}, \text{ кг/ч,}$$

где u – эмпирические коэффициенты, равные:

- для CO – $0,966 \cdot 10^{-3}$; для CH – $0,479 \cdot 10^{-3}$;

- для NO_x – $1,587 \cdot 10^{-3}$ [1];

G_{exhi} – массовый расход $ОГ$ в выпускной системе дизеля на i -м режиме, кг/ч.

При втором способе измерения GAS_x применяется система разбавления полного потока $ОГ$ дизеля воздухом в специальном трубопроводе (разбавляющем туннеле) при постоянном массовом расходе смеси $ОГ$ и воздуха. Название такой системы – CVS (от англ. Constant Volume Sampling). Системой CVS производится измерение на каждом режиме испытаний концентраций загрязняющих веществ в разбавленных $ОГ$ – $conc_i$, что позволяет определить массовые выбросы данных веществ $M_{GAS_{xi}}$:

$$M_{GAS_{xi}} = u \cdot conc_i \cdot G_{edfi}, \text{ кг/ч,}$$

где G_{edfi} – массовый расход разбавленных $ОГ$ в туннеле (равен произведению массового расхода $ОГ$ G_{exhi} на коэффициент разбавления $ОГ$), кг/ч.

При использовании обоих способов показатели GAS_x вычисляются по формуле:

$$GAS_x = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} M_{GAS_{xi}} \cdot WF_i}{\sum_{i=1}^{i=n} P_{ei} \cdot WF_i}, \text{ кг/кВт*ч,}$$

где n – число режимов испытаний;

WF_i – весовой фактор i -го режима;

P_{ei} – эффективная мощность дизеля, измеренная на i -м режиме, кВт.

Измерение среднеэксплуатационного выброса $ТЧ$ с $ОГ$ дизеля – PT производится с использованием разбавляющих туннелей. При этом, в виду высокой стоимости и громозкости полнопоточных CVS-систем, допускается использование мини- и микро-туннелей, в которых разбавляется воздухом небольшая часть от полного потока $ОГ$ двигателя.

На каждом режиме испытательного цикла производится измерение массовых выбросов $ТЧ$ с $ОГ$ дизеля – PT_{massi} :

$$PT_{massi} = \frac{M_{fi}}{M_{sami}} \cdot \frac{G_{edfi}}{1000}, \text{ кг/ч,}$$

где M_{fi} – масса, навески $ТЧ$, собранная на фильтрах, г;

M_{sami} – масса разбавленных ОГ, прошедшая через фильтры для отбора ТЧ, кг.

Показатель PT вычисляется по формуле:

$$PT = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} PT_{massi} \cdot WF_i}{\sum_{i=1}^{i=n} P_{ei} \cdot WF_i}, \text{ кг/кВт}\cdot\text{ч.}$$

Таким образом, при определении показателей GAS_x измеряются параметры: $conc_i$, G_{exhi} (при анализе «сырых» ОГ) или G_{edfi} (при анализе разбавленных ОГ) и P_{ei} , а при определении показателя PT измеряются: M_{fi} , M_{sami} , G_{exhi} и P_{ei} .

Следовательно, погрешности измерений данных параметров являются составляющими результирующих погрешностей измерений величин GAS_x и PT .

2. Методика оценки значимости отдельных составляющих погрешностей δGAS_x и δPT

В основе методики лежит зависимость, позволяющая вычислять погрешность измерения величины y , определяемой косвенным путем по результатам замеров параметров $x_1, \dots, x_n$ с помощью известной зависимости $y = f(x_1, \dots, x_n)$ [6]:

$$\delta y = \frac{\Delta y}{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{y} \cdot \delta x_i \right)^2}, \quad (1)$$

где Δy , δy – абсолютная и относительная погрешности измерений величины y (под y понимаются показатели GAS_x и PT);

$\delta x_1, \dots, \delta x_n$ – относительные погрешности измерений величин $x_1, \dots, x_n$ (под $x_1, \dots, x_n$ понимаются параметры ГАО и двигателя).

Данная методика позволяет установить влияние относительного уменьшения погрешностей измерений параметров ГАО и двигателя – $\overline{\delta x_{i-}}$ на относительное уменьшение результирующих погрешностей измерений нормируемых выбросов загрязняющих веществ с ОГ дизеля:

$$\overline{\delta y_-} = f(\overline{\delta x_{i-}}).$$

При этом величины $\overline{\delta x_{i-}}$ и $\overline{\delta y_-}$ определяются следующим образом:

$$\overline{\delta x_{i-}} = \frac{\delta x_{\max} - \delta x_i}{\delta x_{\max_i}} = 1 - \frac{\delta x_i}{\delta x_{\max_i}}, \quad (2)$$

$$\overline{\delta y_-} = \frac{\delta y_{\max} - \delta y}{\delta y_{\max}} = 1 - \frac{\delta y}{\delta y_{\max}}, \quad (3)$$

где $\delta x_{\max_i}$, δx_i – максимально допустимая и фактическая погрешности измерений параметров x_i ;

$\delta y_{\max}$, δy – максимальная и фактическая погрешности измерений величины y .

Преобразуя зависимость (1) с учетом выражений (2) и (3), получим формулу, отражающую связь между величинами $\overline{\delta y_-}$ и $\overline{\delta x_{i-}}$:

$$\overline{\delta y_-} = 1 - \frac{1}{\delta y_{\max}} \times \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{y} \cdot \delta x_{\max_i} (1 - \overline{\delta x_{i-}}) \right)^2}. \quad (4)$$

Методика предусматривает выполнение следующих операций:

- установление на основе требований нормативных документов значений $\delta x_{\max_i}$;
- вычисление с помощью зависимости (1) и экспериментальных результатов замеров величин GAS_x и PT погрешностей $\delta y_{\max}$;
- построение с помощью выражения (4) зависимостей величины $\overline{\delta y_-}$ от величин $\overline{\delta x_{i-}}$, изменяемых в диапазоне 0...0,5 (предполагается, что точность измерений каждого параметра x_i может быть повышена вдвое);
- оценка значимости составляющих результирующих погрешностей измерений величин GAS_x и PT на основе полученных зависимостей.

3. Результаты исследований и их анализ

В ходе выполнения изложенной методики получены следующие результаты.

Международным стандартом ISO 8178 установлены такие предельные значения погрешностей измерения параметров, определяемых при замерах величин GAS_x и PT [1]: $\delta conc_{\max} = \pm 5\%$ от измеряемого

значения (ИЗ) или $\pm 3,5\%$ от максимального значения диапазона измерений (МЗД) – наименьшая из 2-х величин; $\delta G_{exh} = \pm 4\%$ от МЗД; $\delta P_e = \pm 2\%$ от МЗД; $\delta G_{edf} = \pm 4\%$ от ИЗ; $\delta M_{sam} = \pm 2\%$ от ИЗ и $\delta M_f = \pm 9,3\%$ от ИЗ (при минимальной массе навески на фильтры $\varnothing 70$ мм - 0,75 мг и погрешности измерения массы ТЧ - 0,07 мг).

В качестве исходных данных для проведения исследований использованы результаты испытаний тепловозного дизеля 1А-5Д49 по локомотивному 3-ступенчатому циклу ISO 8178-F [7] (табл. 1).

Таблица 1

Результаты испытаний дизеля 1А-5Д49 по циклу ISO 8178-F

$N_{реж}$	WF	P_e , кВт	Выбросы, кг/ч			
			CO	CH	NO_x	$ТЧ$
1	0,25	2182	12,2	2,84	6,98	0,88
2	0,15	761	5,27	1,91	4,71	0,80
3	0,60	32,5	1,85	0,81	1,18	0,17

С помощью зависимости (1) и данных, представленных в табл. 1, определены максимальные значения результирующих погрешностей измерений показателей GAS_x и PT : при анализе «сырых» ОГ – $\delta CO_{max} = 6,7\%$, $\delta CH_{max} = 6,6\%$, $\delta NO_{xmax} = 6,7\%$; при анализе разбавленных ОГ – $\delta CO_{max} = 4,7\%$, $\delta CH_{max} = 4,4\%$, $\delta NO_{xmax} = 4,5\%$; $\delta PT_{max} = 8,0\%$. Таким образом использование CVS-системы позволяет повысить точность измерений GAS_x в 1,4...1,5 раза.

Построены зависимости (4), отражающие значимость составляющих результирующих погрешностей измерения величин GAS_x и PT (рис. 2). Анализ данных, представленных на рис. 2, показывает:

– при анализе «сырых» ОГ на δGAS_x оказывают влияние: δG_{exh} – наибольшее, $\delta conc$ – существенное, δP_e – не значительное; при анализе разбавленных ОГ на δGAS_x оказывают влияние: $\delta conc$ – наибольшее, δG_{edf} – существенное, δP_e – менее значительное; на δPT оказывают влияние: δM_f – наибольшее, δG_{edf} – существенное, δP_e и δM_{sam} – незначительное;

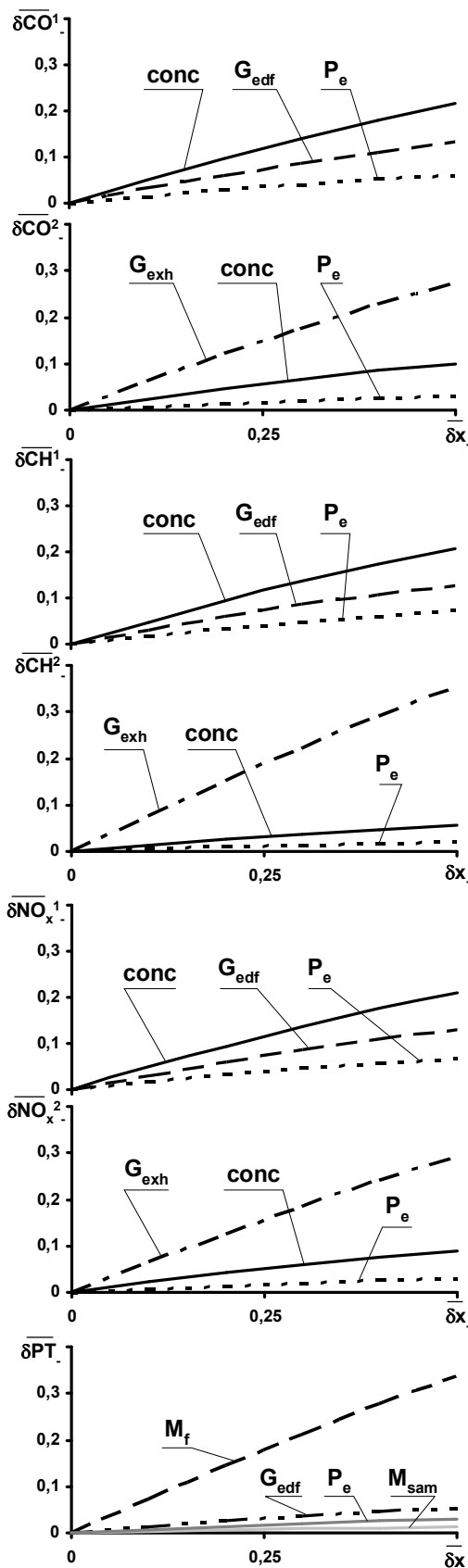


Рис. 2. Результаты исследований зависимостей $\overline{\delta y} = f(\overline{\delta x})$:

1 – измерение GAS_x с помощью SVC- системы;
2 – измерение GAS_x без применения SVC- системы

– для повышения точности измерений нормируемых выбросов загрязняющих веществ с *ОГ* дизелей необходимо снижать погрешности, оказывающие наибольшее и существенное влияние на δGAS_x и δPT ; снижение таких погрешностей в 2 раза позволяет уменьшить δGAS_x^1 , δGAS_x^2 и δPT , соответственно, в 1,6...1,7 (с 6,6...6,7% до 3,9...4,2%), в 1,5 (с 4,4...4,7% до 2,9...3,1%) и в 1,6 (с 8,0% до 4,9%) раза.

Выводы

1. Предложена методика, позволяющая оценивать влияние погрешностей измерений параметров газоаналитического оборудования и испытываемого двигателя на результирующие погрешности измерений нормируемых выбросов газообразных загрязняющих веществ - GAS_x и ТЧ - РТ с *ОГ* дизелей.

2. На основе результатов испытаний тепловозного дизеля 1А-5Д49 по циклу ISO 8178-F рассчитаны максимальные значения результирующих погрешностей измерений показателей GAS_x (6,6...6,7% при анализе «сырых» *ОГ* и 4,4...4,7% при анализе *ОГ*, разбавленных воздухом в системе *CVS*) и *PT* (8,0%). Вычисления показывают, что использование *CVS*-системы (полнопоточного разбавляющего туннеля) обеспечивает более высокую точность измерений показателей GAS_x (в 1,4...1,5 раза), чем при анализе «сырых» *ОГ*.

3. Определены параметры, погрешности измерения которых оказывают наибольшее влияние на результирующие погрешности измерений величин GAS_x и *PT*; к ним относятся: при контроле GAS_x без применения *CVS*-системы – G_{exh} и сопс ; при контроле GAS_x с помощью *CVS*-системы – сопс и G_{edf} ; при контроле РТ – M_f и G_{edf} .

Литература

1. ISO 8178. Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 1: Test –

bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions, 1996. – 94 p.

2. Regulation № 49. Revision 2. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) engines and vehicles equipped with C.I. engines with the regard to the emission of pollutants by the engine. Geneva, 1992. – 114 p.

3. Regulation № 96. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) engines to be installed in agricultural and forestry tractors with regard to the emissions of pollutants by the engine. Geneva, 1995. – 109 p.

4. ISO 8178. Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 4: Test cycles for different engine applications, 1996. – 18 p.

5. Нормативно-методичні матеріали з проблем екології тепловозів. Част. 1. / Довідкові матеріали для інженерно-технічних і технічних працівників локомотивного господарства. – Х.: ХДАЗТ, 2000. – 28 с.

6. Измерения в промышленности. Справ. изд. в 3-х кн. Кн. 1. Теоретические основы. Пер. с нем. / Под ред. П. Профоса. – М.: Металлургия, 1990. – 49 с.

7. Накопление экспериментальных данных по дымности и токсичности отработавших газов тепловозов 2ТЭ116 и 2ТЭ10У с целью сравнения их экологических показателей // Разработка методики и оценка уровня дымности и токсичности отработавших газов магистральных тепловозов. Отработка и анализ экспериментальных данных: Техническая информация к этапу 2 / Ворошиловгр. машиностр. ин-т. – Тема № Н-030-88; № ГР 01880082888. – Ворошиловград, 1990. – 39 с.

Поступила в редакцию 4.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.И. Осенин, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, Луганск.